

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора, професора кафедри телекомунікацій,
медійних та інтелектуальних технологій Хмельницького національного
університету

Бойка Юлія Миколайовича на дисертаційну роботу

Бондарева Олександра Сергійовича

на тему «Методи підвищення ефективності використання каналів
супутникового зв'язку та навігації для безпілотних авіаційних систем»
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації»
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

1. Актуальність теми дисертації

Дисертаційна робота Бондарева Олександра Сергійовича присвячена актуальному науково-прикладному завданню підвищення ефективності використання каналів супутникового зв'язку та навігації для безпілотних авіаційних систем. Ця тема є своєчасною з огляду на інтенсивний розвиток безпілотних авіаційних комплексів, розширення сфер їх застосування та зростання вимог до стійкості комунікаційно-навігаційного забезпечення.

У сучасних умовах безпілотні авіаційні системи виконують завдання моніторингу, розвідки, спостереження за об'єктами критичної інфраструктури, логістичного забезпечення, пошуково-рятувальних операцій та місій за межами прямої видимості. Для таких сценаріїв критичними є не лише наявність каналу зв'язку, а й його якість, затримка, доступність, рівень втрат пакетів, актуальність навігаційних даних, точність позиціонування та здатність системи керування зберігати стійкість за несприятливих умов.

Особливої ваги дослідження набуває в умовах радіоелектронного протистояння, коли на роботу БПЛА можуть впливати деградація супутникового каналу, навігаційні завади, джамінг та спуфінг. Такі впливи здатні порушити

нормальний перебіг місії, знизити точність навігації, спричинити відхилення від маршруту або створити ризик втрати керованості апарата.

Актуальність роботи також визначається тим, що у значній частині існуючих підходів зв'язок, навігація, інерціальна система, фільтрація даних і керування БПЛА розглядаються як окремі підсистеми. Водночас для реального функціонування безпілотного комплексу важливим є саме їх взаємний вплив. Затримки та втрати в каналі зв'язку можуть призводити до застарівання навігаційної інформації, зниження частоти коректних оновлень фільтра, збільшення похибки позиціонування та погіршення якості керування.

З огляду на це розроблення комплексної моделі оцінювання ефективності радіотехнічних систем БПЛА, а також методів виявлення підміни координат і забезпечення переходу до інерціальної навігації є актуальним завданням для галузі телекомунікацій та радіотехніки. Тема дисертації має належне теоретичне значення і безпосередню практичну спрямованість.

2. Наукова новизна одержаних результатів

У дисертаційній роботі отримано результати, які мають ознаки наукової новизни та спрямовані на розвиток методів оцінювання й підвищення ефективності комунікаційно-навігаційних систем безпілотних авіаційних комплексів.

До основних наукових результатів дисертаційної роботи належать такі.

1. Вперше розроблено комплексну модель оцінки ефективності системи зв'язку та навігації безпілотних авіаційних комплексів, яка враховує сукупність параметрів якості зв'язку, зокрема затримку, джитер, втрати пакетів, доступність каналу та повторні передачі, а також їх вплив на динамічну точність навігації, актуальність навігаційної інформації, похибку позиціонування і стійкість керування.

2. Вперше розроблено метод виявлення та нівелювання впливу підміни координат на якість визначення місцезнаходження в умовах зовнішнього впливу завад. Запропонований підхід орієнтований на оперативне виявлення навігаційних аномалій, використання допоміжної інформації та активну перевірку достовірності навігаційного рішення.

3. Удосконалено метод перемикавання на інерціальну систему навігації за рахунок оперативного виявлення підміни координат та вибору оптимальної INS-системи з урахуванням цільової ефективності, обчислювальної складності реалізації та ресурсних обмежень.

4. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для практичної реалізації запропонованих методів і моделей, зокрема вебзастосунок для комплексної оцінки ефективності функціонування системи зв'язку та навігації БпАК.

Отримані результати є логічно пов'язаними між собою: комплексна модель оцінювання формує основу для кількісного аналізу стану системи, метод виявлення підміни координат забезпечує діагностику небезпечних навігаційних впливів, а удосконалений підхід до переходу на INS спрямований на збереження безперервності навігаційного забезпечення. Така сукупність результатів підтверджує самостійний внесок здобувача у розв'язання поставленого науково-прикладного завдання.

3. Мова та стиль викладення дисертації

Дисертаційна робота написана українською мовою з використанням фахової термінології у сфері телекомунікацій, супутникового зв'язку, GNSS-навігації, інерціальних навігаційних систем, безпілотних авіаційних комплексів, радіоелектронної боротьби та математичного моделювання.

Матеріал загалом викладено послідовно та у науковому стилі. Автор використовує таблиці, рисунки, блок-схеми, математичні залежності та алгоритмічні описи, що сприяє кращому розумінню запропонованих моделей і методів. У роботі простежується прагнення до формалізації досліджуваних процесів та їх подання у вигляді моделей, критеріїв і алгоритмів.

Разом із тим окремі фрагменти тексту потребують додаткового редакційного опрацювання з погляду стилістичної однорідності, точності термінів і усунення технічних описок. Зазначене не впливає на зміст основних наукових результатів, але може бути враховане автором під час подальшої підготовки матеріалів до публікації.

4. Загальна структура та зміст дисертаційної роботи

Дисертаційна робота має логічну структуру, що відповідає меті та завданням дослідження. Вона складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовано мету та завдання дослідження, об'єкт, предмет і методи дослідження, наведено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, а також відомості про апробацію і публікації.

У першому розділі досліджено ефективність використання каналів супутникового зв'язку та навігації для безпілотних авіаційних систем. Розглянуто технології супутникового зв'язку, особливості його застосування для БПЛА, вимоги до каналів зв'язку, стійкість до радіоелектронної боротьби, основні вимоги до навігаційних систем, альтернативні методи навігації, архітектуру супутникової комунікаційно-навігаційної системи та вплив радіоелектронних перешкод.

У другому розділі виконано формалізацію архітектури супутникової комунікаційно-навігаційної системи. Автор розробляє модель супутникових каналів зв'язку та навігації, розглядає імовірнісні характеристики надійності каналу, оцінювання втрат пакетів, завад, точності супутникової навігації та впливу роботи засобів радіоелектронної боротьби. Важливим результатом розділу є формування інтегрального підходу до оцінювання ефективності системи позиціонування і спільного критерію «зв'язок – навігація».

У третьому розділі запропоновано методи підвищення ефективності функціонування системи супутникової навігації для БПЛА. Основну увагу приділено виявленню та протидії спуфінгу, інтегрованому методу з автоматичним перемиканням на інерціальну навігацію, вибору оптимальної INS-системи та оцінюванню обчислювальної складності запропонованого методу.

У четвертому розділі наведено реалізацію та оцінку ефективності розроблених методів і моделей. Описано вебзастосунок для оцінки ефективності функціонування системи зв'язку та навігації для БПЛА, а також проаналізовано

отримані результати. Цей розділ демонструє прикладну спрямованість роботи та можливість практичного використання запропонованих рішень.

Загальні висновки відповідають змісту дисертації, відображають основні результати дослідження та узгоджуються з поставленими завданнями. Загалом структура роботи є цілісною, а зміст дисертації відповідає заявленій темі.

5. Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення дисертаційної роботи полягає у можливості використання запропонованих моделей, методів і програмних засобів під час розроблення, модернізації та оцінювання систем супутникового зв'язку й навігації для безпілотних авіаційних комплексів.

Комплексна модель оцінки ефективності системи зв'язку та навігації може бути застосована для аналізу впливу параметрів каналу зв'язку на точність навігації, актуальність навігаційних даних, якість керування та ризик втрати керованості. Такий підхід дозволяє оцінювати функціонування БПЛА не за окремими параметрами, а за сукупністю взаємопов'язаних характеристик.

Метод виявлення та нівелювання впливу підміни координат може бути використаний як складова системи підвищення навігаційної стійкості БПЛА в умовах зовнішніх завад і навмисних впливів на GNSS-сигнал. Його застосування спрямоване на своєчасне виявлення нелегітимних координат, обмеження їх впливу на систему керування та зменшення ризику відхилення від заданого маршруту.

Удосконалений метод перемикання на інерціальну навігаційну систему має прикладне значення для забезпечення безперервності навігації у випадках деградації або компрометації GNSS-даних. Алгоритм вибору оптимальної інерційної навігаційної системи може бути корисним під час обґрунтування технічних рішень для БПЛА із різними вимогами до точності, автономності, вартості, масогабаритних характеристик і обчислювальних ресурсів.

Розроблений вебзастосунок для комплексної оцінки ефективності системи зв'язку та навігації БПЛА може використовуватися як інструмент підтримки прийняття рішень під час сценарного моделювання, порівняння параметрів системи та формування рекомендацій щодо її удосконалення.

6. Зауваження по дисертаційній роботі

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу Бондарева О.С., доцільно висловити окремі зауваження та побажання:

1. У роботі запропоновано низку інтегральних показників, а саме узагальнену функцію ефективності J (формула 2.35), інтегральну QoS-метрику (2.40), індекс ефективності системи E_{sys} (рис. 2.6) та інтегральну оцінку INS-системи K_i (3.19). Водночас методику призначення вагових коефіцієнтів не формалізовано. Зокрема, не зазначено, чи використовувались експертні процедури (наприклад, метод парних порівнянь), і не наведено аналіз чутливості інтегральних показників до варіації ваг, який показав би стійкість ранжування сценаріїв. Крім того, складові функції (2.35) мають різну фізичну розмірність (похибка позиціонування у метрах, затримки у мілісекундах, безрозмірні ймовірності), тому доцільно було б детальніше обґрунтувати процедуру нормування компонент перед зважуванням, а також принципи вибору порогових значень ψ_{thr} (3.11) та e_{thr} .

2. Правило прийняття рішення про спуфінг $\psi(t) \geq \psi_{thr}$ (3.10)–(3.11) за своєю природою відповідає класичній задачі статистичного виявлення, однак характеристики виявлення в роботі не досліджено у термінах ймовірностей правильного виявлення та хибної тривоги. Не наведено ROC-залежностей, обґрунтування вибору порогу (наприклад, за критерієм Неймана–Пірсона) та залежності затримки виявлення від швидкості наростання спуфінгового зміщення. Заявлене у висновках підвищення достовірності виявлення на 15–25% отримано за результатами імітаційного моделювання, проте не вказано обсяг статистичного експерименту (кількість реалізацій) і довірчі інтервали оцінок. Роботу також посилив би аналіз поведінки методу у складних комбінованих сценаріях, коли спуфінг поєднується з джамінгом (зниженням C/N_0) або частковою деградацією каналу зв'язку, оскільки саме енергетична ознака $\Delta C/N_0$ у таких умовах може втрачати селективність.

3. В частині, присвяченій переходу на інерціальну навігацію (п. 3.2, 3.3), доцільно було б детальніше розкрити обмеження застосування режиму INS HOLD для БПЛА з різними класами інерціальних сенсорів (MEMS, волоконно-оптичні, кільцеві лазерні гіроскопи). Доцільно було б також навести модель

накопичення дрейфу (нестабільність зміщення нуля, випадкове блукання кута) та оцінити граничну тривалість автономної роботи без GNSS-корекції, за якої похибка не перевищує критичного значення e_{crit} . Це дозволило б визначити межі справедливості наведених у висновках кількісних оцінок (час переходу 5–20 с, зменшення максимальної похибки на 40–60%) залежно від класу застосованої ІНС.

4. Ефективність запропонованих методів підтверджено імітаційним моделюванням у середовищі Mathcad та розрахунками вебзастосунку NavComEval, однак у роботі не окреслено програму подальшої верифікації та валідації моделі в частині порівняння результатів з експериментальними даними реальних супутникових каналів або напівнатурним моделюванням (hardware-in-the-loop). Розроблений вебзастосунок має очевидну прикладну цінність, проте доцільно було б ширше подати приклади його використання для різних типових місій БпАК та різних рівнів інтенсивності радіоелектронного впливу, що дозволило б оцінити адекватність моделі у ширшій області параметрів.

5. У підрозділі 2.3 для опису структурованих втрат пакетів залучено модель Гілберта–Елліота (2.39), тоді як оцінка затримки ARQ (2.28)–(2.29) ґрунтується на геометричній моделі з незалежними втратами. Доцільно було б обґрунтувати узгодженість цих припущень, оскільки пакетування помилок у каналі з РЕБ суттєво впливає на розподіл кількості повторних передач, а отже, на затримку TARQ та «вік» навігаційної інформації. Окремої уваги заслуговує і застосовність моделі до LEO-систем зв'язку з частими хендоверами, оскільки числові приклади орієнтовані переважно на геостационарний сегмент ($D_{prop} \approx 250$ мс).

6. У роботі використано значну кількість спеціалізованих понять і позначень, які потребують уніфікації. Зокрема, позначення ω_i вжито одночасно для трьох різних наборів вагових коефіцієнтів — у функції ефективності (2.35), в інтегральному індикаторі спуфінгу (3.10) та в багатокритеріальній оцінці INS-системи (3.19)–(3.20), тоді як в інших інтегральних показниках ваги позначено як β_i (2.40) та w_i (рис. 2.6), паралельно вживаються варіанти "джемінг" і "джамінг".

Наведені зауваження мають рекомендаційний характер, не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи та можуть бути враховані автором у подальших наукових дослідженнях.

7. Висновок про дисертаційну роботу

Дисертаційна робота Бондарева Олександра Сергійовича на тему «Методи підвищення ефективності використання каналів супутникового зв'язку та навігації для безпілотних авіаційних систем» є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому розв'язано актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності використання каналів супутникового зв'язку та навігації для безпілотних авіаційних систем.

Одержані результати мають наукову новизну, теоретичне значення та практичну цінність, зокрема з позиції комплексного оцінювання радіотехнічної системи БПЛА, підвищення стійкості БПЛА до навігаційних завад, виявлення спуфінгу, вибору оптимальної інерційної навігаційної системи та програмної реалізації засобів оцінювання ефективності.

За актуальністю, змістом, рівнем обґрунтованості та значенням отриманих результатів дисертаційна робота відповідає вимогам, що ставляться до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії, а її автор, Бондарев Олександр Сергійович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Офіційний опонент

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри телекомунікацій,
медійних та інтелектуальних технологій
Хмельницького національного університету



Підпис дійсний
Відділ кадрів

Олександр Степаненко

Юлій БОЙКО